

Polymerization  
Quarterly, 2024  
Volume 14, Number 2  
Pages 27-40  
ISSN: 2252-0449

# A Review on Carbon Quantum Dots and Their Potential Applications as Filler in Rubber Nanocomposites

Mehdi Ghanbari Adivi\* and Akbar Shojaei

Department of Chemical and Petroleum Engineering, Sharif University of Technology,  
P.O. Box 11155-9465, Tehran, Iran

Received: 13 August 2023, Accepted: 8 November 2023

## Abstract

Carbon quantum dots (CQDs) are a special subset of carbon nanoparticles with average dimensions about 10 nm. Their unique properties include low toxicity, chemical inertness, excellent biocompatibility, and tunable luminescence behavior by surface modification. There are several sources for synthesis of CQDs in nature, each of which has different effects on the properties of these particles. So far, several methods have been used to synthesize CQDs including laser ablation, microwave radiation, hydrothermal reaction, electrochemical oxidation, reflux method, and ultrasonication. Due to the small particle size, CQDs have strong tunable fluorescent properties. The usage of these particles has been examined in various fields such as photocatalysis, ion sensor, biological imaging, heavy metal detection, adsorption treatment, supercapacitor, membrane fabrication, and water pollution treatment. Research works on the field of using CQDs in polymer materials, especially CQDs-reinforced composite materials have received attention in recent years. This is due to unique properties of carbon quantum dots such as renewability, stability, high mechanical properties, low weight, and comparatively low cost. This review article is aimed to discuss the physical, chemical and stability properties of CQDs, raw materials and synthesis methods as well as their potential applications in various fields, especially in the rubber industry. Finally, recent developments in the field of using carbon quantum dots in rubber products and their effects on the improvement of mechanical and dynamic properties are reviewed.

## Key Words

carbon quantum dots,  
rubber,  
filler,  
nanocomposite,  
reinforcement

(\*) To whom correspondence should be addressed.  
E-mail: mehdighanbari2111@gmail.com

# مروری بر نقاط کوانتومی کربن و کاربردهای بالقوه آنها به عنوان پرکننده در نانوکامپوزیت‌های لاستیکی

مهدی قنبری عدیوی\*، اکبر شجاعی

تهران، دانشگاه صنعتی شریف، دانشکده مهندسی شیمی و نفت، صندوق پستی ۹۴۶۵-۱۱۱۵۵

دریافت: ۱۴۰۲/۵/۲۲، پذیرش: ۱۴۰۲/۸/۱۷

نقاط کوانتومی کربن، زیرمجموعه خاصی از نانوذرات کربنی با اندازه حدود ۱۰ nm هستند. از خواص منحصر به فرد آنها می‌توان به سمیت کم، بی‌اثری شیمیایی، زیست‌سازگاری عالی و رفتار درخشایی تنظیم‌پذیر با اصلاح سطح اشاره کرد. منابع خام متعددی برای تهیه نقاط کوانتومی کربن در طبیعت وجود دارد که هر یک اثر متفاوتی بر خواص این ذرات دارند. تاکنون برای تهیه این ذرات روش‌های متعددی از جمله برسایش لیزری، تابش ریزموج، واکنش گرمایی، اکسایش الکتروشیمیایی، بازروانی و فراصوت‌دهی به‌کارگرفته شده‌اند. نقاط کوانتومی کربن به دلیل اندازه ذرات کوچک دارای خواص فلئورسان تنظیم‌پذیر قوی هستند. از این ذرات می‌توان در کاربردهای متنوع مانند نورکاتالیزگر، حسگر یونی، تصویربرداری زیستی، تشخیص فلزات سنگین، تصفیه بر جذبی، ابرخازن، ساخت غشا و تصفیه آلودگی آب بهره برد. در سال‌های اخیر، پژوهش‌ها در زمینه استفاده از نقاط کوانتومی کربن در مواد پلیمری، به‌ویژه مواد کامپوزیتی تقویت‌شده با این نانوذرات، مورد توجه قرار گرفته‌اند. این مسئله به دلیل خواص منحصر به فرد نقاط کوانتومی کربن از قبیل تجدیدپذیری، پایداری، خواص مکانیکی زیاد، سبکی و ارزانی آنهاست. هدف از این مقاله، بررسی خواص فیزیکی، شیمیایی و پایداری نقاط کوانتومی کربن و معرفی انواع مواد اولیه، روش‌های ساخت و کاربردهای آنها، به‌ویژه در صنعت لاستیک است. در نهایت، پیشرفت‌های اخیر در زمینه استفاده از نقاط کوانتومی کربن در محصولات لاستیکی و اثر آنها بر خواص مکانیکی و دینامیکی مرور می‌شود.

## چکیده



مهدی قنبری عدیوی



اکبر شجاعی

## واژگان کلیدی

نقاط کوانتومی کربن،  
لاستیک،  
پرکننده،  
نانوکامپوزیت،  
تقویت‌کننده

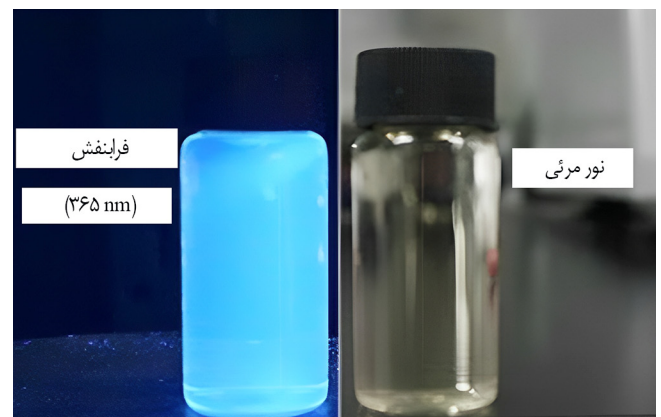
## مقدمه

به طور کلی، نقاط کوانتومی کربن دسته‌ای از نانوذرات هستند که دارای عنصر کربن بوده و اندازه آن‌ها حدود ۱۰ nm است [۱]. نقاط کوانتومی کربن، نانومواد فلئورسان هستند که به دلیل اثر محصورشدن کوانتومی (quantum confinement effect) قوی، دارای خواص درخشایی و نورالکترونیکی تنظیم‌پذیر هستند [۲]. گروه‌های عاملی اکسیژن‌دار روی سطوح نقاط کوانتومی کربن ساختار سطحی و اندازه ذرات آن‌ها را تغییر می‌دهد تا آثار محصورشدن کوانتومی نشان دهند [۳]. این نانوذرات به دلیل پایداری زیاد، زیست‌سازگاری خوب، سمیت کم [۴]، پراکنش زیاد در آب، هزینه ساخت کم و نیز پایداری نوری عالی [۵] گزینه مناسبی برای استفاده در تصفیه فاضلاب [۶] هستند. همچنین، نقاط کوانتومی کربن فعالیت فلئورسان زیاد، بی‌اثری شیمیایی و استحکام را به دلیل اثر محصورشدن کوانتومی و خواص پایداری نوری نشان می‌دهند [۷،۸]. با توجه به شکل ۱، رنگ نانوذرات زمانی که در معرض تابش نور فرابنفش قرار می‌گیرند به آبی روشن تبدیل می‌شوند. هنگامی که الکترون‌ها به حالت پایه بازمی‌گردند، فوتونی به صورت رنگ آبی درخشان منتشر می‌شود [۱۰]. با این حال، خواص فلئورسان نقاط کوانتومی کربن نیز تحت تأثیر خواص انتشاری پیش‌سازهای کربن است که به عنوان ماده خام استفاده می‌شوند. تعداد زیادی از پیش‌سازهای کربن را می‌توان برای تهیه نانوذرات مدنظر استفاده کرد [۱۱]. چند ماده خام حاوی تعداد زیادی پیش‌سازهای کربن، مانند قندها، سیتریک اسید و کربوهیدرات‌ها، پیش‌تر به دلیل ساختارهای آلی پیچیده آن‌ها در ساخت نقاط کوانتومی کربن استفاده شده‌اند [۱۲،۱۳]. این ذرات می‌توانند در تشخیص یون‌های فلزات سنگین [۱۴]، حذف آلاینده‌های آلی و معدنی

[۱۵] و تخریب نورکاتالیزی آلاینده‌های فاضلاب [۸،۱۶] به سبب خواص نیمه‌رسانایی عالی، نوردرخشایی (photoluminescence) زیاد [۱۷]، ضدباکتری بودن و انتقال الکترون در اثر تابش نور و سایر استفاده شوند [۱۸]. نقاط کوانتومی کربن، نانوذرات نیمه‌رسانایی هستند که برپایه مواد کربنی تشکیل می‌یابند. بدین دلیل این ذرات را می‌توان در علوم مربوط به نانوفناوری [۱۹] و ساخت حسگرها، به دلیل بی‌اثری شیمیایی متمایز و زیست‌سازگاری عالی [۲۰] به کار برد. همچنین، می‌توان آن‌ها را در شناسایی مولکول‌های زیستی [۷،۲۱]، تشخیص فلزات سنگین [۲۲]، فرایند نورکاتالیزی [۲۳] استفاده کرد. نقاط کوانتومی کربن، حساسیت زیادی نسبت به نور مرئی دارند که می‌تواند عملکرد نورکاتالیزی را افزایش دهد. زیرا، آن‌ها از قابلیت تبدیل طیف نور خورشید به طول موج مدنظر برای نورکاتالیزگر برخوردارند [۲۴]. نقاط کوانتومی کربن از لحاظ خواص مکانیکی نیز به سبب ساختار و آرایش پیوندهای پیرامون اتم کربن، پایداری مکانیکی خوبی نشان می‌دهند. وجود کربن هیبرید شده  $sp^2$  در ساختار نقاط کوانتومی کربن، موجب می‌شود تا در برابر نیروهای خارجی بدون تغییر شکل درخور توجه یا آسیب ساختاری مقاومت کنند [۲۵]. هدف این مقاله بررسی ویژگی‌های نقاط کوانتومی کربن است که آن‌ها را برای کاربردهای متنوع مناسب می‌کند. مواد اولیه استفاده‌شده در ساخت نقاط کوانتومی کربن، روش‌های ساخت و ویژگی‌های آن‌ها نیز مرور می‌شود. افزون بر این، به کاربرد بالقوه این نانوذرات به عنوان پرکننده و تقویت‌کننده در زمینه نانوکامپوزیت‌های لاستیکی پرداخته می‌شود.

## مواد اولیه تهیه نقاط کوانتومی کربن

بر اساس مطالعات پیشین، نقاط کوانتومی کربن از منابع کربن طبیعی مختلف، مانند سیتریک اسید [۴]، میکروذرات گرافیتی [۲۶]، شیر واسرشته [۲۲]، سدیم هیدروکسید [۲۷]، کلم بروکلی [۲۸]، آمونیوم سترات [۲۳]، علف [۱۵]، هیومیک اسید [۲۹]، اسکوربیک اسید [۳۰] و ژلاتین [۳۱] ساخته شده‌اند. در پژوهش‌های قبلی، استفاده از ضایعات زیست‌توده برای ساخت نقاط کوانتومی کربن به طور بسیار محدودی گزارش شده است [۹]. بنابراین، ساخت نانوذرات یادشده از مواد زائد به عنوان بخشی از پژوهش‌ها برای به حداقل رساندن ضایعات صنایع ضروری هستند. بر مبنای مطالعات پیشین، سیتریک اسید یکی از رایج‌ترین مواد خام استفاده‌شده در ساخت نقاط کوانتومی کربن بوده، زیرا از گروه‌های کربونیل، کربوکسیل و هیدروکسیل تشکیل شده است [۳۲،۳۳]. در پژوهش‌های آینده، این ماده خام را می‌توان با مواد پایدار دارای ساختار شیمیایی



شکل ۱- شکل ظاهری محلول نقاط کوانتومی کربن تحت تابش نورهای فرابنفش و مرئی [۹].

جدول ۱- ساخت نقاط کوانتومی کربن با استفاده از مواد اولیه و روش‌های مختلف برای کاربردهای متنوع.

مرجع	مواد خام	روش سنتز	شرایط واکنش	کاربرد-نوع مطالعه
۲۸	کلم بروکلی	گرماپی	۶ h و ۱۹۰ °C	شناسایی یون نقره
۳۷	میله‌های گرافیتی	الکتروشیمیایی	۶ V و ۵ day	نورکاتالیزگر
۳۸	گرافیت مداد	بازروانی	۲۴ h و ۱۹۰ °C	افزایش پاسخ الکتروشیمیایی
۲۶	ذرات گرافیتی	برسایش لیزری	۴۰ V و ۵۰ kHz	ساخت و مشخصه‌یابی
۳۵	زیلان	ریزموج	۶ min و ۲۰۰ °C	حسگر تتراسایکلین
۳۹	گلوکوز	فراصوت‌دهی	۷۰۰ V و ۴ h	فعالیت الکتروشیمیایی

طول فرایند ساخت با نیتروژن دوپه شده‌اند تا چگالی الکترونی آن‌ها تغییر کند. همچنین، روش مزبور می‌تواند خواص فلئوئورسان آن‌ها را افزایش دهد [۳۵]. در مطالعات قبلی با موفقیت از گلوکوز [۳۶] و کلسترول [۳۴] به‌عنوان مواد خام برای سنتز نانوذرات استفاده شده است. با توجه به رشد سریع تولید روغن نخل و برخلاف درآمدهای اقتصادی زیاد آن برای کشور، تولید این روغن مقدار زیادی ضایعات مانند خوشه‌های میوه ایجاد می‌کند که آثار منفی بر محیط زیست می‌گذارد. از آنجا که این ضایعات دارای مقدار کربن زیاد بوده که به‌طور عمده الیاف تجدیدپذیر و سازگار با محیط زیست هستند [۱۲]، می‌توان آن‌ها را به‌عنوان ماده اولیه خوب و قابل اعتماد برای تولید نقاط کوانتومی کربن با کیفیت به‌شمار آورد.

### روش‌های سنتز نقاط کوانتومی کربن

برای تهیه این ذرات تاکنون روش‌های متعدد از جمله برسایش لیزری، تابش ریزموج، واکنش گرمایی، اکسایش الکتروشیمیایی، بازروانی و فراصوت‌دهی به‌کار گرفته شده‌اند. در جدول ۱، تهیه نقاط کوانتومی کربن با استفاده از مواد اولیه و روش‌های مختلف برای کاربردهای متنوع نشان داده شده است.

### بازروانی

از روش‌های سنتز، فراصوت‌دهی نانولوله‌های کربنی چندجداره در مخلوطی از اسیدهای نیتریک و سولفوریک غلیظ به مدت ۲ h است که پس از آن در دمای ۸۰ °C به مدت ۸ h بازروانی می‌شود. پس از پایان واکنش، از سدیم هیدروکسید برای رقیق‌سازی محیط اسیدی پیش از انجام دیالیز با غشای دیالیز و حذف محلول‌های اسیدی اضافی استفاده شده است [۱۳]. اسیدهای غلیظ برای تبدیل مواد اولیه به واحدهای کوچک‌تر استفاده می‌شوند [۳۸]. به‌کمک این فرایند، ساخت نقاط کوانتومی کربن با اثر درخشایی قوی امکان‌پذیر می‌شود [۴۰].

مشابه، جایگزین کرد. به‌عنوان مثال، مواد پایدار را می‌توان بالقوه از ضایعات گیاهی، الیاف میوه، ضایعات پودرهای قهوه یا چای و همچنین ضایعات صنعت روغن نخل به‌دست آورد که مقدار کربن زیادی دارند. افزون بر این، جهت‌گیری پژوهش‌ها در این زمینه می‌تواند به تحقق نزدیک صفرشدن تخلیه پسماندها، به‌ویژه ضایعات صنعت آسیاب روغن نخل، صنایع غذایی، مزارع چای و سایر زیست‌توده‌ها کمک کند.

به‌طور کلی، نقاط کوانتومی کربن با عملکرد سطحی مولکول‌های آلی یا معدنی از طریق کربن و اکسایش مواد خام ساخته می‌شوند [۳۴]. از مزایای استفاده از منابع کربن سبز یا ضایعات محصولات آلی برای ساخت این ذرات می‌توان به صرفه اقتصادی، سازگاری با محیط زیست و دسترس‌پذیری گسترده در طبیعت اشاره کرد [۵]. در همین حال، ساختار شیمیایی، اندازه کوانتومی و خواص نوردرخشایی آن‌ها به ساختار شیمیایی مواد خام و روش‌های ساخت به‌کاررفته بستگی دارد [۷]. تشکیل گروه‌های عاملی اکسیژن‌دار در ساختار این نانوذرات می‌تواند انتشار فلئوئورسان وابسته به تحریک ایجاد کند. افزون بر این، خواص فیزیکی شیمیایی آن‌ها را می‌توان با تغییر غلظت پیش‌سازها، زمان واکنش، pH محلول و دمای واکنش تنظیم کرد [۳۱]. بنابراین، نقاط کوانتومی کربن برای کاربردهای چندمنظوره تبدیل انرژی، دستگاه‌های الکترونیکی نوری، تصویربرداری زیستی و فناوری‌های تصفیه آب مناسب هستند [۲۲]. افزون بر این، ساخت نقاط کوانتومی کربن با استفاده از منابع کربن طبیعی بدون قرارگیری در معرض محیط اسیدی یا شیمیایی به‌دلیل آثار کوانتومی زیاد و نافع شدن پیش‌سازها به‌شدت تشویق می‌شود [۱۴].

اصلاح شیمیایی و عامل‌دار کردن سطح مواد خام آلی و معدنی می‌تواند خواص فیزیکی، ساختارهای شیمیایی و آثار فلئوئورسان نانوذرات را بهبود بخشد [۸]. به‌عنوان مثال، نانوذرات مدنظر در

## فراصوت‌دهی

فرایند فراصوت‌دهی، روش دیگری برای تولید نقاط کوانتومی کربن است [۳۹]. در این روش، گلوکوز در آب حل شده و سپس محلول سدیم هیدروکسید به آن اضافه می‌شود. در برخی از کارهای تجربی از سولفوریک اسید غلیظ [۴۱] برای اکسایش گلوکوز نیز استفاده شده است. در این روش، محلول به مدت ۴ h تا ۵ h در معرض امواج فراصوت قرار می‌گیرد تا ضمن اختلاط ذرات در محلول، پیوندهای کربنی و همچنین دگرگونی‌های شیمیایی و فیزیکی را از بین ببرد. همچنین، رادیکال‌ها و حباب‌های آزاد بیشتری تولید می‌شود، واکنش‌پذیری واکنش‌دهنده‌ها بهبود می‌یابد، شکل‌شناسی کنترل می‌شود و نقص‌های سطحی نقاط کوانتومی کربن کاهش می‌یابد [۴۲].

## اکسایش الکتروشیمیایی

در پژوهشی از روش لایه‌برداری الکتروشیمیایی [۳۷] برای تهیه نقاط کوانتومی استفاده شده است که در آن از دو میله گرافیتی به‌عنوان الکترود استفاده می‌شود. الکترولیت استفاده‌شده آب مقطر و جریان پتانسیل ساکن ۱۵ V تا ۶۰ V در الکترودها برقرار می‌شود. در این روش، به دلیل آب‌کافت مولکول‌های آب، یون‌های هیدروکسید و پروتون می‌توانند تولید شوند.

## برسایش لیزری

در روش برسایش لیزری، لیزر به پیش‌سازهایی تابانده می‌شود که در آب غوطه‌ورند. مزیت اصلی این روش، عدم استفاده از مواد شیمیایی خطرناک است. در پژوهشی از این فن با به‌کارگیری میکروذرات بلوری استفاده شده است [۲۶]. در این پژوهش، ماده اولیه در آب حل شده و از لیزر تارای پالسی نانوثانیه (طول موج ۱۰۷۰ nm، مدت پالس حدود ۵۰ ns و تکرار پالس بین ۱ kHz تا ۵۰۰ kHz) استفاده شده است. پرتو لیزر بر گرافیت پراکنده در آب به عمق ۵ mm از سطح مشترک هوا و مایع متمرکز می‌شود. انرژی گرمایی باعث تکه‌تکه شدن شدید مواد کربنی به ذرات کوچک‌تر می‌شود. در این روش، برای جلوگیری از ته‌نشینی نیاز به هم‌زدن مداوم دارد [۵]. مشاهده شد، اندازه این نانوذرات را می‌توان با تغییر زمان تابش لیزر و بهینه‌سازی سایر پارامترها مانند سرعت تکرار و مدت زمان پالس، توان و طول موج لیزر تغییر داد.

## تابش ریزموج

نقاط کوانتومی کربن با استفاده از روش تابش امواج ریزموج تهیه می‌شوند که در آن تحت پلیمرشدن و کربناتی شدن قرار می‌گیرند



شکل ۲- فرایند گرمایی سنتز نقاط کوانتومی کربن با استفاده از واکنشگاه فولاد زنگ‌نزن با پوشش تفلون [۲۸].

[۴۳]. در این روش، مواد کربنی انرژی الکترومغناطیسی را جذب و به انرژی گرمایی تبدیل می‌کنند. تابش ریزموج به دلیل مدت زمان کوتاه و سرعت واکنش زیاد، روش مؤثری است [۳۵].

## روش گرمایی

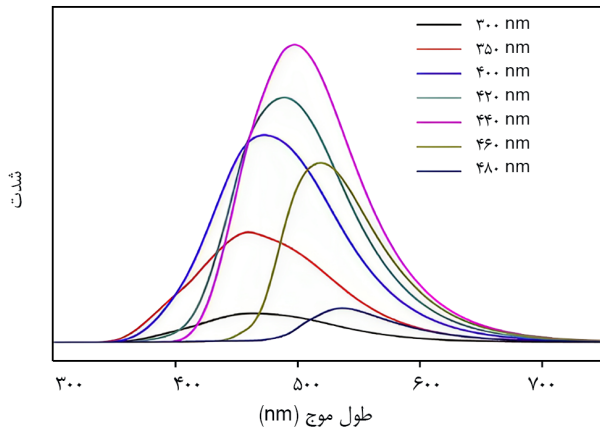
این فرایند شامل گرمادهی ترکیبات کربن در دما و فشار زیاد است که امکان برهم‌کنش پیش‌سازها و مولکول‌های آب را فراهم می‌کند [۴۴]. شرایط پرفشار را می‌توان با استفاده از اتوکلاو از جنس فولاد زنگ‌نزن با پوشش تفلون کنترل کرد. در شکل ۲، روش سنتز گرمایی برای حصول نانوذرات مطلوب با استفاده از ماده اولیه کلم بروکلی نمایش داده شده است.

## روش‌های مشخصه‌یابی نقاط کوانتومی کربن

روش‌های مختلفی برای مشخصه‌یابی نقاط کوانتومی کربن استفاده می‌شود. گروه‌های عاملی روی سطح را می‌توان با طیف‌سنجی زیرقرمز تبدیل فوریه (FTIR) تجزیه و تحلیل کرد. شکل ۳، گروه‌های عاملی مختلف نقاط کوانتومی کربن تعیین شده با استفاده از فن FTIR را نشان می‌دهد [۴۵]. منحنی این طیف، پیک‌هایی را در  $1608 \text{ cm}^{-1}$  مربوط به ارتعاش کششی گروه‌های O-H،  $1130 \text{ cm}^{-1}$  مربوط به کشش C-O نشان می‌دهد که بیانگر وجود گروه‌های عاملی اکسیژن‌دار ناشی از ساختار حلقه آروماتیک است. دو قله دیگر در  $1710 \text{ cm}^{-1}$  و  $2850 \text{ cm}^{-1}$  دیده می‌شود که به ترتیب با C=C در حلقه‌های آروماتیک و خمش C-H مطابقت دارد [۴۵].

از آزمون میکروسکوپ الکترونی عبوری (TEM) برای به‌دست‌آوردن داده‌های شکل‌شناسی و اندازه ذرات کوانتومی



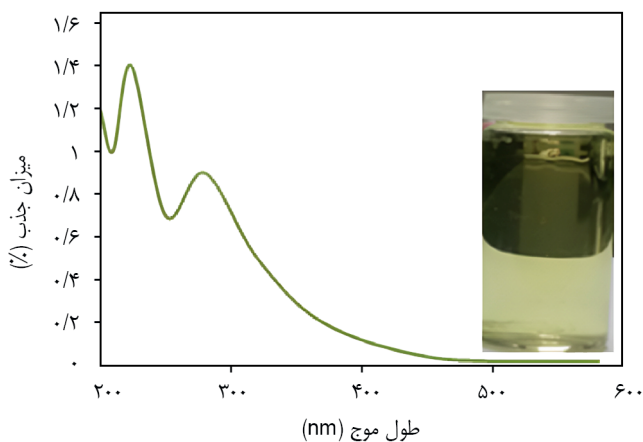


شکل ۵- طیف نوردرخشایی نقاط کوانتومی کربن تولیدشده از گلوکوز. هر منحنی بیانگر یک طیف در طول موج معینی بوده که رنگ آنها در راهنمای شکل نشان داده شده است [۳۹].

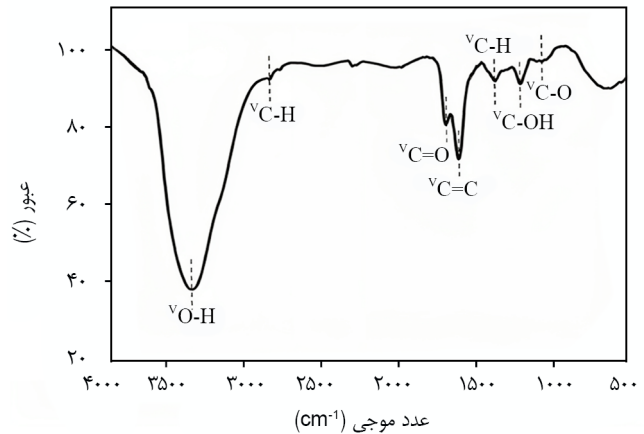
اندازه‌گیری تقریباً ۲۰۰ ذره محاسبه شده است. بر این اساس، اندازه متوسط ذرات کمتر از ۱۰ nm (معادل با ۷/۸۹ nm) به دست آمد. افزون بر این، نوردرخشایی (PL) همان‌طور که در شکل ۵ نمایش داده شده است، می‌تواند برای تجزیه و تحلیل انتشار نور و برانگیختگی در محدوده تشخیص ۲۰۰ nm تا ۱۰۰۰ nm استفاده شود. همچنین، طیف جذب فرابنفش-مرئی (UV-Vis) در محدوده ۲۰۰ nm تا ۸۰۰ nm را می‌توان طبق شکل ۶ برای بررسی رفتار نوری نقاط کوانتومی کربن استفاده کرد.

### کاربردهای نقاط کوانتومی کربن

همان‌طور که در مقدمه هم اشاره شد، نقاط کوانتومی کربن را می‌توان در زمینه‌های مختلف به کار گرفت. از جمله کاربردهای

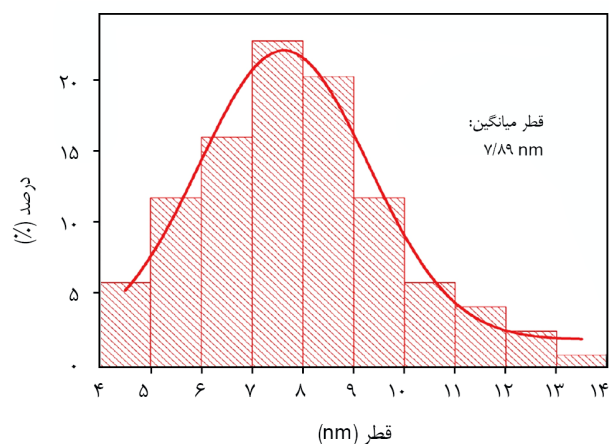
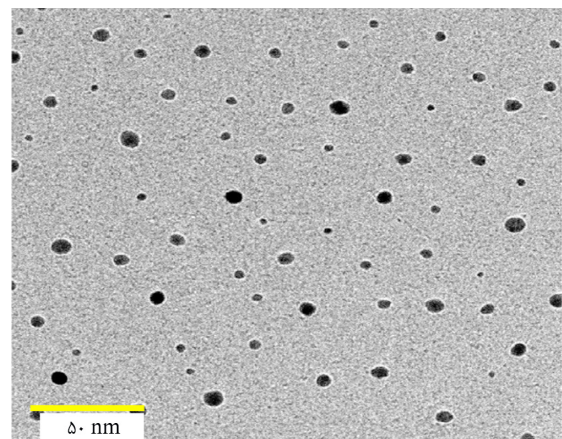


شکل ۶- طیف نور فرابنفش-مرئی نقاط کوانتومی کربن در دو بیک جذب شاخص در طول موج‌های ۲۲۴ nm و ۲۸۰ nm [۴۳].

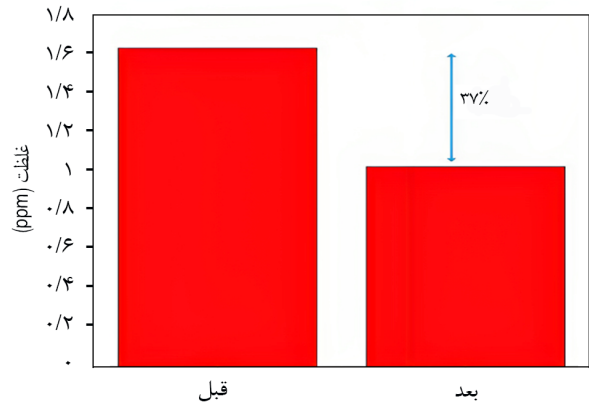
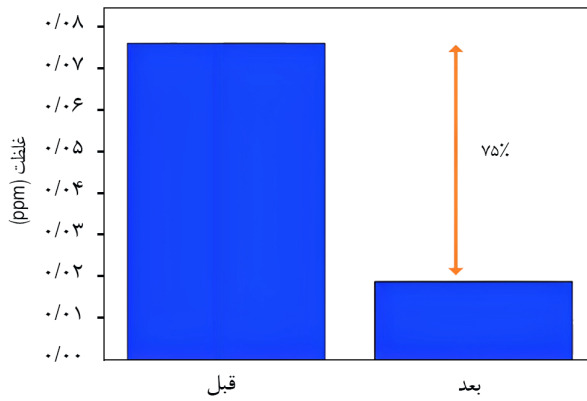


شکل ۳- طیف FTIR از نقاط کوانتومی کربن تولیدشده از آب لیمو [۴۵].

استفاده می‌شود. نمونه‌ای از شکل‌شناسی ذرات نقاط کوانتومی کربن با استفاده از TEM در شکل ۴ نشان داده شده است. در این شکل، ذرات با توزیع اندازه همگن و بدون تجمع درخور توجه در مقیاس نانو مشاهده می‌شود. توزیع و متوسط اندازه ذرات با

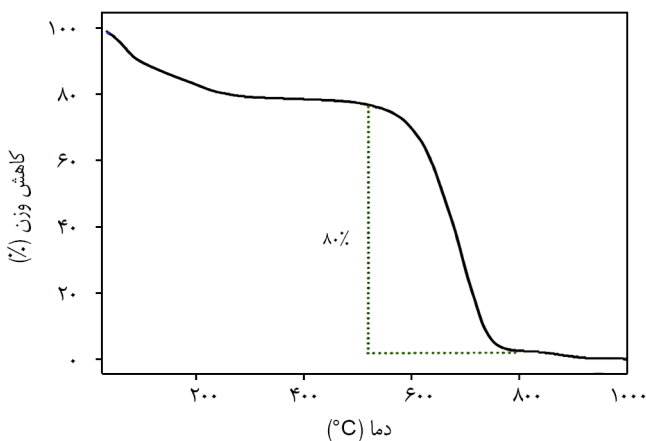


شکل ۴- تصویر میکروسکوپ الکترونی عبوری و توزیع اندازه ذرات نقاط کوانتومی کربن [۳۵].



شکل ۷- حذف Cd<sup>2+</sup> و Pb<sup>2+</sup> با استفاده از نقاط کوانتومی کربن دوپه‌شده با نیتروژن [۱۳].

نقاط کوانتومی کربن در ۹۵٪ شدت اولیه حفظ می‌شود. این مشاهدات نشان داد، نقاط کوانتومی کربن ممکن است دارای پایداری عالی با ذخیره انرژی باشند. سایر پژوهش‌ها نشان داد، نقاط کوانتومی کربن پایداری خوبی در محلول با قدرت یونی زیاد برای حداقل ۲ h نشان می‌دهد و پس از دو ماه نگهداری در یخچال ۴ °C پایدار می‌مانند [۷]. افزون بر این، پایداری گرمایی نقاط کوانتومی کربن قبلاً مطالعه شده است. شکل ۹، منحنی گرمایزنی نقاط کوانتومی کربن را نشان می‌دهد. دیده می‌شود، بلافاصله پس از ۵۰۰ °C، وزن به‌طور پیوسته و شدید تا حدود ۷۵۰ °C کاهش می‌یابد. در پی آن، یک منحنی گرمایی پایدار تا ۱۰۰۰ °C مشاهده می‌شود. وزن در مرحله سوم تقریباً ۸۰٪ کاهش می‌یابد که احتمالاً به دلیل جدا شدن گروه‌های عاملی و تجزیه ساختار گرافیتی در این منطقه است [۴۱]. مطالعه دیگری نشان داده است، پایداری طولانی‌مدت نقاط کوانتومی کربن در آب یونزدوده بیش از ۱۵ روز در دمای محیط بدون هیچ‌گونه تغییر شایان توجهی برقرار است [۲۸].

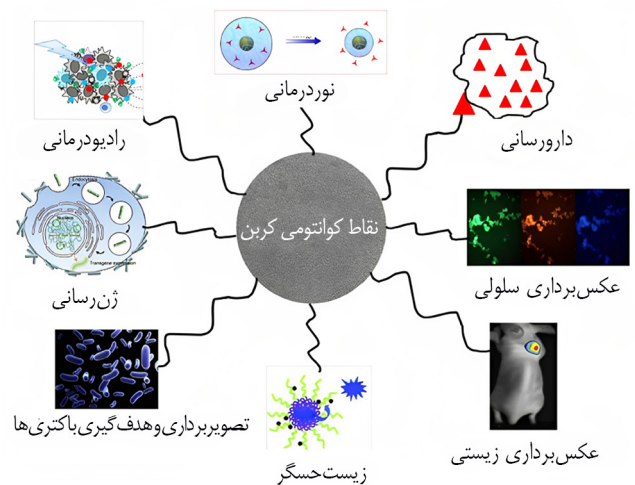


شکل ۹- نمودار تجزیه گرمایزنی نقاط کوانتومی کربن [۴۱].

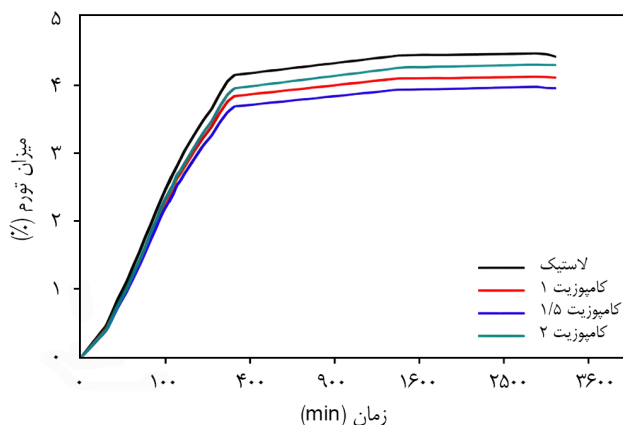
اخیر، نقاط کوانتومی کربن می‌توان به استفاده در زمینه نورکاتالیزگر [۴۶]، فلئورسان [۱۶]، گندزدایی فاضلاب و تصفیه جذبی [۱۵]، نانوکامپوزیت‌های غشایی [۳۱] و زیست‌پزشکی [۴۷] اشاره کرد. در شکل ۷، کاربرد نقاط کوانتومی کربن دوپه‌شده با نیتروژن برای حذف Cd<sup>2+</sup> و Pb<sup>2+</sup> نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، این نانوذرات نقش مؤثری در از بین بردن این یون‌ها ایفا می‌کنند. همچنین در نگاه دیگری به سایر کاربردهای متنوع این نانوذرات در شکل ۸، کاربردهای نقاط کوانتومی کربن در حوزه زیست‌پزشکی نشان داده شده است.

### پایداری نقاط کوانتومی کربن

نقاط کوانتومی کربن پیش‌تر در دمای ۴ °C به مدت یک ماه نگهداری می‌شدند تا پایداری آن‌ها ارزیابی شود [۲۱]. با تجزیه و تحلیل فلئورسان نقاط کوانتومی کربن مشخص شد، شدت فلئورسان



شکل ۸- کاربردهای نقاط کوانتومی کربن در زیست‌پزشکی [۴۷].

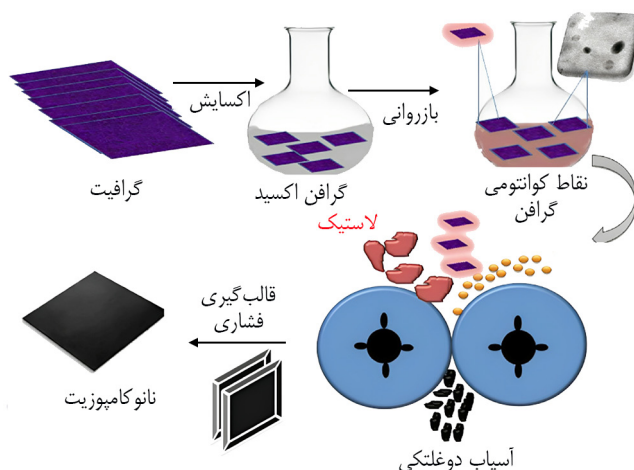


شکل ۱۱- اثر بارگذاری پرکننده بر جذب آب در نانوکامپوزیت لاستیک طبیعی-نقاط کوانتومی گرافن [۴۸].

را نشان می‌دهد.

در گزارشی Edayadiyil و همکاران، نانوکامپوزیت لاستیک طبیعی-نقاط کوانتومی گرافن را تهیه کردند. افزودن ۱ phr نانوذرات باعث افزایش ۳۰٪ استحکام کششی، ۱۳٪ ازدیاد طول تا پارگی و ۲۳٪ مدول یانگ این نانوکامپوزیت در مقایسه با لاستیک طبیعی خام شد. نانوکامپوزیت تهیه شده با ۱/۵ phr پرکننده، پایداری گرمایی بیشتر را نشان داد. پایداری گرمایی بهبود یافته به توزیع همگن نانوذرات در ماتریس لاستیک طبیعی و برهم‌کنش آن در ماتریس، نسبت داده شد. خواص مکانیکی نانوکامپوزیت مدنظر با بارگذاری‌های متفاوت پرکننده در جدول ۳ نشان داده شده است. بهبود درخور توجه در خاصیت کششی نانوکامپوزیت‌ها، دلیل آشکاری بر پراکندگی یکنواخت و برهم‌کنش نقاط کوانتومی گرافن با لاستیک طبیعی است. در ابتدا، با افزایش مقدار پرکننده از ۱ phr به ۱/۵ phr، استحکام کششی نانوکامپوزیت نیز افزایش یافت، اما بارگذاری بیشتر آن در اثر انبوهش، استحکام کششی نانوکامپوزیت را کاهش داد [۴۸].

اثر بارگذاری نقاط کوانتومی گرافن بر جذب حلال نانوکامپوزیت در شکل ۱۱ نشان داده شده است. سرعت جذب حلال نانوکامپوزیت



شکل ۱۰- نمای کلی از فرایند آماده‌سازی نانوکامپوزیت لاستیک طبیعی-نانوذرات کوانتومی گرافن [۴۸].

گزارش دیگری بیان شده است، پایداری فلئورسان نقاط کوانتومی کربن پس از ۳۰ روز بدون تغییر باقی می‌ماند. این مشاهدات نشان می‌دهد، نقاط کوانتومی کربن را می‌توان برای کاربردهای مختلف بدون کاهش واکنش‌پذیری و اثربخشی آن استفاده کرد.

#### استفاده از نقاط کوانتومی کربن به عنوان پرکننده لاستیک

پرکننده‌ها برای ارتقای خواص لاستیک استفاده می‌شوند. از انواع پرکننده می‌توان به دوده، سیلیکا، خاک رس، کلسیم کربنات و سایر اشاره کرد. نقاط کوانتومی کربن هم به‌تازگی توانسته‌اند، نقش برجسته‌ای را در این باره ایفا کنند. شکل ۱۰، فرایند تهیه یک نمونه نانوکامپوزیت لاستیکی تقویت شده با نانوذرات کوانتومی گرافن را نشان می‌دهد. مراحل متفاوت مانند سنتز نانوذرات پرکننده (تقویت‌کننده)، اختلاط اجزای لاستیکی، قالب‌گیری و غیره نیز در شکل نمایش داده شده است. در پژوهش‌های انجام شده طی سال‌های اخیر، انواع متفاوتی از نقاط کوانتومی کربن در ماتریس‌های لاستیکی مختلف به‌کار برده شده‌اند. جدول ۲، کارهای انجام شده در زمینه کاربرد نقاط کوانتومی کربن به‌عنوان پرکننده در لاستیک

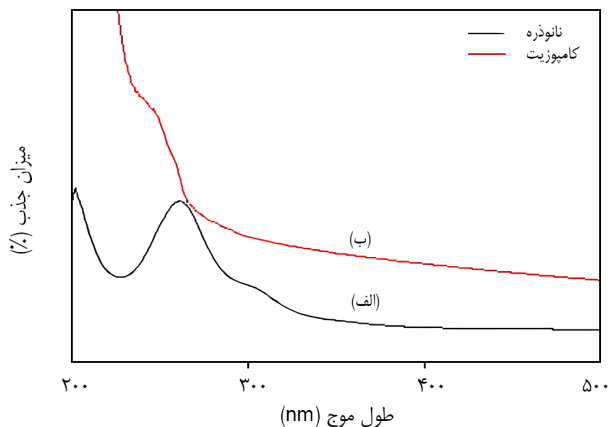
جدول ۲- پژوهش‌های انجام شده درباره کاربرد نقاط کوانتومی کربن در لاستیک.

سال	محدوده اندازه ذرات (nm)	روش سنتز پرکننده	پرکننده	ماتریس	مرجع
۲۰۲۱	۵-۱۰	بازروانی	نقاط کوانتومی گرافن	لاستیک طبیعی	۴۸
۲۰۲۰	۱/۵-۵	بازروانی	نقاط کوانتومی گرافن آمینی	لاستیک نیتریل بوتادی‌ان هیدروژن‌دار شده	۴۹
۲۰۱۹	۱-۴	فراصوت	نقاط کوانتومی کربن سیلانی	لاستیک سیلیکون	۵۰



جدول ۳- خواص مکانیکی لاستیک طبیعی و نانوکامپوزیت لاستیک طبیعی-نانوذرات کوانتومی گرافن [۴۸].

نمونه	استحکام کششی (MPa)	ازدیاد طول تا پارگی (%)	مدول یانگ (MPa)
لاستیک طبیعی	۷/۱۸	۳۳۹	۷/۷۹
کامپوزیت ۱	۱۰/۳۰	۳۹۲	۱۰/۲۰
کامپوزیت ۱/۵	۹/۳۳	۳۴۶	۱۰/۵۹
کامپوزیت ۲	۹/۲۸	۳۲۰	۹/۵۵



شکل ۱۲- طیف جذب نور فرابنفش-مرئی: (الف) نقاط کوانتومی کربن و (ب) کامپوزیت لاستیک سیلیکون-نقاط کوانتومی کربن [۵۰].

می‌دهد، بدین دلیل ازدیاد طول تا پارگی و استحکام کششی نیز با افزودن پرکننده با کاهش همراه بوده‌اند [۵۰].

طیف جذب نور فرابنفش-مرئی نقاط کوانتومی کربن در شکل ۱۲ الف، دو پیک جذب قوی را در ۲۰۲ و ۲۶۱ nm نشان می‌دهد. پیک جذب در ۲۰۲ nm از انتقال  $\pi \rightarrow \pi^*$  بخش C=C ناشی می‌شود. در حالی که پیک در ۲۶۱ nm به دلیل انتقال  $\pi \rightarrow \pi^*$  پیوند C=O است. برعکس، کامپوزیت‌های لاستیک سیلیکون-نقاط کوانتومی کربن محدوده جذب گسترده‌تری را در شکل ۱۲ ب نشان می‌دهند که احتمالاً به دلیل برهم‌کنش نانوذرات و لاستیک است.

گرمناگاشت لاستیک سیلیکون در شکل ۱۳ الف نشان داده شده است. دمای شروع تخریب گرمایی  $378/2^\circ\text{C}$  است. سپس، لاستیک سیلیکون از طریق کاهش وزن آهسته در دمایی بین ۴۰۰ و  $800^\circ\text{C}$  و در نهایت بازده باقی‌مانده زغالی در  $900^\circ\text{C}$ ، ۵۸/۷۴٪ نشان می‌دهد. افزون بر این، نمودار گرماوزن‌سنجی کامپوزیت لاستیک سیلیکون-نقاط کوانتومی کربن، در شکل ۱۳ ب نشان داده شده است. دمای شروع تخریب گرمایی  $400/8^\circ\text{C}$  است. سپس، کامپوزیت در محدوده  $450^\circ\text{C}$  تا  $700^\circ\text{C}$  کاهش می‌یابد. در نهایت، بازده باقی‌مانده زغال در دمای  $900^\circ\text{C}$ ، ۳۱/۹۲٪ است. بنابراین

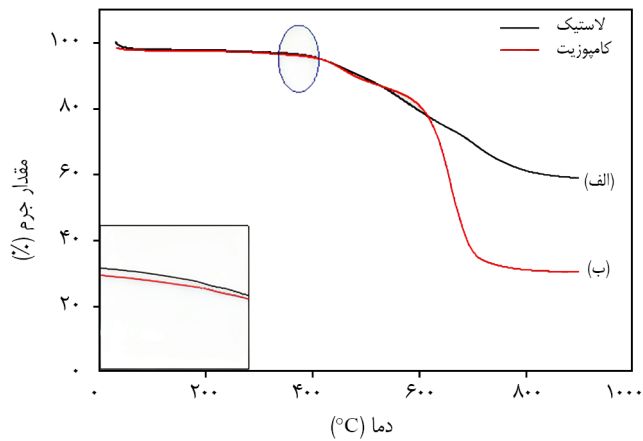
به میزان بارگذاری پرکننده بستگی دارد. لاستیک طبیعی بیشترین جذب حلال را در میان تمام نمونه‌های مطالعه‌شده نشان می‌دهد. با افزایش مقدار نقاط کوانتومی گرافن، جذب آب کاهش می‌یابد و به حداقل مقدار در ۱/۵ phr از پرکننده می‌رسد. سپس، با افزایش مقدار نقاط کوانتومی گرافن، مقدار جذب افزایش می‌یابد.

Xie و همکاران، نقاط کوانتومی گرافن آمینی را در لاستیک نیتریل بوتادی‌ان هیدروژن‌دار شده استفاده کرده و به دو روش فیزیکی و شیمیایی آن‌ها را مخلوط کردند. هدف اصلی آن‌ها از فرایند هیدروژن‌دار کردن، بهبود مقاومت در برابر پیرش لاستیک بود [۴۹]. خواص لاستیک مانند استحکام کششی و ازدیاد طول تا پارگی برای دو حالت پیش و پس از پیرش در جدول ۴ نشان داده شده است. مطابق با نتایج، استحکام کششی با افزودن نانوذرات (به‌طور فیزیکی و شیمیایی) در هر دو حالت پیش و پس از پیرش نسبت به لاستیک خام افزایش یافته و ازدیاد طول تا پارگی هم تا مقدار بهینه افزایش و سپس کاهش یافته است.

در پژوهش دیگری Li و همکاران از نقاط کوانتومی کربن سیلانی در لاستیک سیلیکون استفاده کردند. نتایج آزمون‌های مکانیکی در جدول ۵ فهرست شده‌اند. نتایج نشان می‌دهد، سختی و مدول کشسانی کامپوزیت‌ها با افزودن پرکننده به لاستیک، افزایش می‌یابد. برخلاف تشکیل اتصالات عرضی Si-H در کامپوزیت‌ها، مقدار کمی جدایی فاز میان نقاط کوانتومی کربن و لاستیک سیلیکون رخ

جدول ۴- خواص مکانیکی فیلم‌های کامپوزیتی پیش و پس از آزمون پیرش [۴۹].

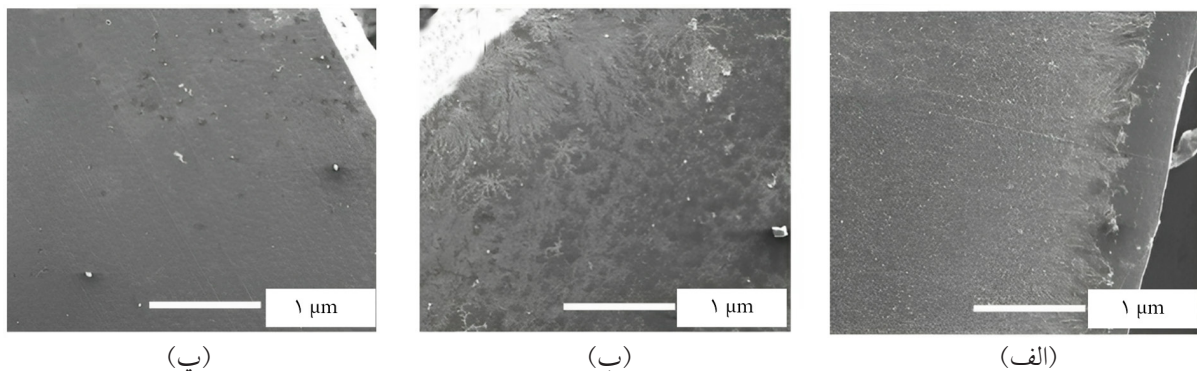
ضریب پیرش	ازدیاد طول تا پارگی (%)		استحکام کششی (MPa)		نمونه
	پس از پیرش	پیش از پیرش	پس از پیرش	پیش از پیرش	
۱۰۲/۴	۵۲۹	۵۹۹	۱۱/۳	۹/۸	لاستیک
۱۰۴/۱	۵۴۶	۶۷۳	۱۳/۴	۱۰/۹	کامپوزیت (روش فیزیکی)
۱۵۳/۹	۵۱۸	۳۷۰	۱۳/۱	۱۱/۹	کامپوزیت (روش شیمیایی)



شکل ۱۳- منحنی گرماوزن سنجی: (الف) لاستیک سیلیکون و (ب) کامپوزیت لاستیک سیلیکون-نقاط کوانتومی کربن [۵۰].

می‌کند و ترکیب نانوذرات طلا-پلی‌آنیلین-لاستیک سیلیکون دوباره سطح را به حالت نرم و صاف برمی‌گرداند.

شکل ۱۵، نتایج آزمون کشش پژوهش Kong و همکاران را نشان می‌دهد. آن‌ها از نقاط کربنی به‌عنوان پرکننده در لاستیک کلروپرن استفاده کردند. لاستیک کلروپرن به‌عنوان نوعی لاستیک خوداستحکام معمولی، دارای تنش کششی  $24/4 \text{ MPa}$  و ازدیاد طول تا پارگی  $1229\%$  است. در کامپوزیت‌های ساخته‌شده، نقاط کربنی نقش دوگانه اتصال‌دهنده شیمیایی و نانوپرکننده را با برهم‌کنش سطحی قوی ایفا می‌کنند. نمونه دارای  $6 \text{ phr}$  پرکننده دارای تنش کششی  $30/8 \text{ MPa}$ ، ازدیاد طول تا پارگی  $1355\%$  و مدول  $5/3 \text{ MPa}$  در کرنش  $10\%$  است. این مقادیر به ترتیب  $26$ ،  $10$  و  $39\%$  بیش از نمونه لاستیک خام کلروپرن است. با این حال، استحکام کششی نانوکامپوزیت دارای  $9 \text{ phr}$  پرکننده، کمتر از نانوکامپوزیت با  $6 \text{ phr}$  پرکننده است. بنابراین، افزودن بیش از حد نانوذرات می‌تواند خواص مکانیکی نانوکامپوزیت لاستیکی را کاهش دهد [۳۶].



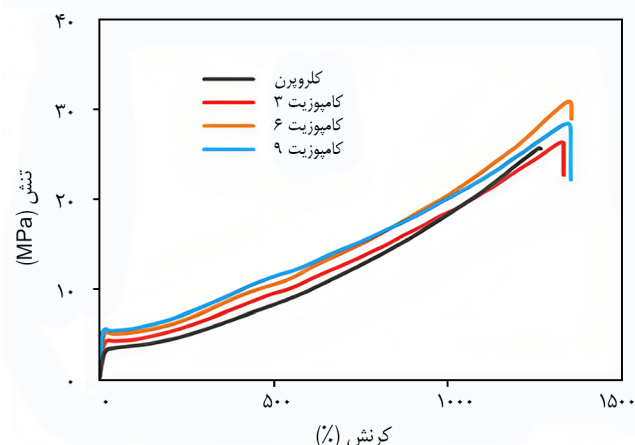
شکل ۱۴- ماهیت ظاهری سطح نمونه‌های: (الف) نانوذرات طلا-پلی‌آنیلین/لاستیک سیلیکون، (ب) پلی‌آنیلین-لاستیک سیلیکون و (ب) لاستیک سیلیکون [۵۱].

جدول ۵- اثر نقاط کوانتومی کربن اصلاح‌شده بر خواص مکانیکی کامپوزیت‌های لاستیک سیلیکون-نقاط کوانتومی کربن [۵۰].

نمونه	استحکام کششی (MPa)	مدول کشسانی (MPa)	ازدیاد طول تا پارگی (%)	سختی (shore A)
لاستیک	۱/۲	۰/۶	۱۷۶	۴۵
کامپوزیت	۱/۱	۰/۷	۱۵۱	۴۷

می‌توان نتیجه گرفت، دمای شروع تخریب گرمایی کامپوزیت لاستیک سیلیکون-نقاط کوانتومی کربن کمی بیش از لاستیک سیلیکون است. زیرا، نقاط کوانتومی کربن به‌عنوان عامل اتصال عرضی عمل می‌کنند و دما را افزایش می‌دهند. افزون بر این، بازده باقی‌مانده نهایی کامپوزیت کمتر از لاستیک سیلیکون بوده که احتمالاً به دلیل برهم‌کنش لاستیک و نانوذرات پرکننده است. این مسئله به ساختار زنجیر شبکه‌ای فشرده‌تر و پیچیده‌تر در کامپوزیت منجر می‌شود و ساختار منظم زنجیر پلیمری لاستیک سیلیکون از بین می‌رود.

Takemura و همکاران درباره شناسایی ویروس سندروم لکه سفید (نوعی بیماری در آبزیان)، در این زمینه پژوهشی انجام داده‌اند. لاستیک سیلیکونی رسانا (CSR) برای ساخت نوعی ماتریس حسگر یک‌بار مصرف متشکل از نقاط کوانتومی گرافن هم‌دوپه‌شده با نیتروژن و گوگرد ( $N,S\text{-GQDs}$ ) و نانوکامپوزیت طلا-پلی‌آنیلین ( $\text{AuNP-PANI}$ ) استفاده شد. یک پادتن خاص ضدسندرم لکه سفید به سطح این نانوکامپوزیت متصل شده و با موفقیت برای تشخیص ویروس استفاده شد [۵۱]. در شکل ۱۴ تصویر میکروسکوپ الکترونی پوششی نمونه‌های لاستیک سیلیکون، پلی‌آنیلین-لاستیک سیلیکون و همچنین نانوذرات طلا-پلی‌آنیلین-لاستیک سیلیکون نمایش داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، لاستیک سیلیکون سطح صاف و نرمی دارد و با افزودن پلی‌آنیلین، سطح ماهیت زبری پیدا



شکل ۱۵- نمودار تنش کرنش نمونه‌های نانوکامپوزیتی بر پایه لاستیک کلروپرن و پرکننده‌های نقاط کربنی [۳۶].

## نتیجه‌گیری

پیشرفت‌های اخیر در مطالعه نقاط کوانتومی کربن با تمرکز بر خواص شیمیایی و فیزیکی، مواد خام استفاده‌شده، روش‌های ساخت و زمینه‌های کاربردی، به‌ویژه نانوکامپوزیت‌های لاستیکی معرفی و مرور شد. مواد اولیه به‌کاررفته برای ساخت نقاط کوانتومی کربن شامل سیتریک اسید، اسکوربیک اسید، گرافیت، منابع گیاهی، میوه‌ها، کربوهیدرات‌ها، ژلاتین، کلسترول، گلوکوز، لیگنین ضایعات زیستی و آمونیوم سیترات هستند. با این حال، ساخت نقاط کوانتومی کربن از مواد پایدار (منابع گیاهی و ضایعات کربن) باید به‌دلیل مقرون به صرفه بودن، دسترس‌پذیری گسترده، سمیت کم و سازگاری با محیط زیست در اولویت قرار گیرد. افزون بر این، این موضوع می‌تواند مصرف مواد شیمیایی و تولید زباله را کاهش دهد. نقاط کوانتومی کربن را می‌توان از طریق روش‌های مختلف مانند گرمایی، تابش لیزر، فرایند گرمایش، اکسایش الکتروشیمیایی، تابش امواج ریزموج و فراصوت تهیه کرد. با این حال، واکنش گرمایی بیشترین استفاده را در تولید نقاط کوانتومی کربن دارد. این روش براساس سامانه آب کار می‌کند و می‌توان آن را یکی از آسان‌ترین و مقرون به صرفه‌ترین روش‌ها در نظر گرفت، زیرا به دستگاه‌های ساده و ارزان، مصرف انرژی کم و آماده‌سازی یک‌مرحله‌ای نیاز است. اگرچه نیازمند گرمایش طولانی‌مدت (۸ h تا ۱۲ h) است، اما به هیچ‌نوع فرایند تصفیه نیاز ندارد، زیرا محصول به‌دست‌آمده خلوص زیاد و حلالیت آب خوبی دارد. همچنین از بازده کوانتومی زیاد، اندازه ذرات یکنواخت و خواص درخشایی

قوی برخوردار است. تصفیه فاضلاب، کاربردهای زیست‌پزشکی، نورکاتالیز، حسگرها، شناسایی فلزات سنگین و سایر با استفاده از نقاط کوانتومی کربن به‌دلیل سمیت کم، اثر فلوتورسان قوی، پایداری نورشیمیایی زیاد و زیست‌سازگاری عالی بررسی شد. نقاط کوانتومی کربن به‌سبب کارایی در کاربردهای مختلف برای حل مسائل صنعتی مناسب هستند. چالش اصلی در استفاده از نقاط کوانتومی کربن در زمینه‌های مختلف، بازده کوانتومی و کیفیت نقاط تولیدشده است. مطالعات آینده ممکن است شامل ارزیابی ویژگی‌های فیزیکی شیمیایی نقاط کوانتومی کربن و اثر درخشایی آن‌ها بر اساس مواد خام و روش‌های به‌کاررفته باشد. مطالعاتی که در مقیاس آزمایشگاهی انجام می‌شوند، می‌توانند عملکرد آینده نقاط کوانتومی کربن را برای استفاده کارآمد به‌عنوان نانوذره در کاربردهای زیست‌محیطی آسان کنند. از هیبرید این نانوذرات با سایر نانوذرات می‌توان در نانوکامپوزیت‌های لاستیکی استفاده کرد. همچنین در این مسیر می‌توان از اصلاح سطح و دوپه‌کردن با سایر عناصر مانند نیتروژن و گوگرد بهره برد. افزودن نقاط کوانتومی کربن به لاستیک با توجه به خاصیت نیمه‌رسانای آن‌ها موجب افزایش خاصیت رسانندگی لاستیک می‌شود که به این نکته می‌توان در کارهای آینده توجه کرد. نقاط کوانتومی کربن کاربردهای متنوعی در زمینه‌های مختلف دارند که پیش‌تر به آن‌ها اشاره شد. در سال‌های اخیر، کاربرد این نقاط در کامپوزیت‌های لاستیکی پنجره جدیدی گشوده است. با توجه به روند استفاده از این نانوذرات به‌عنوان پرکننده در سال‌های گذشته، می‌توان انتظار داشت، در کارهای پژوهشی پیش رو، علاقه‌مندی جدی برای پژوهشگران به این زمینه ایجاد شود. هر یک از سامانه‌های پخت مختلف می‌توانند اثر ویژه‌ای بر ویژگی‌های این نانوکامپوزیت‌ها داشته باشند. آن‌ها ممکن است رفتار و خواص مکانیکی، گرمایی و الکتریکی متفاوتی نشان دهند. در حال حاضر، با توجه به استفاده از این نانوذرات در کامپوزیت‌های لاستیکی در برهه اخیر، نانوذرات نقاط کوانتومی کربن در مقیاس آزمایشگاهی و کارهای پژوهشی به‌کار گرفته شده‌اند. پیش‌بینی می‌شود، در صورت ایجاد خواص چشمگیر در لاستیک، قابلیت بالقوه استفاده در مصارف کاربردی و مقیاس صنعتی را بیابند. دستیابی به این مهم، مستلزم پژوهش‌های بیشتر برای یافتن آثار مثبت این نانوذره بر خواص مختلف مواد لاستیکی است که شاید در دهه آینده موضوع پژوهش‌های پژوهشگران مختلف قرار گیرد.

## مراجع

- Xue B., Yang Y., Sun Y., Fan J., Li X., and Zhang Z., Photoluminescent Lignin Hybridized Carbon Quantum Dots Composites for Bioimaging Applications, *Int. J. Biol. Macromol.* **122**, 954-961, 2019.
- Joshi P.N., Mathias A., Mishra A., and Mathias A., Synthesis of Ecofriendly Fluorescent Carbon Dots and Their Biomedical and Environmental Applications, *Mater. Technol.*, **33**, 680-672, 2018.
- Liang Z., Yang J., Zhou C., Mo Q., and Zhang Y., Carbon Quantum Dots Modified BiOBr Microspheres with Enhanced Visible Light Photocatalytic Performance, *Inorg. Chem. Commun.*, **90**, 97-100, 2018.
- Lim H., Liu Y., Kim H.Y., and Son D.I., Facile Synthesis and Characterization of Carbon Quantum Dots and Photovoltaic Applications, *Thin Solid Films*, **660**, 672-677, 2018.
- Das R., Bandyopadhyay R., and Pramanik P., Carbon Quantum Dots from Natural Resource: A Review, *Mater. Today Chem.*, **8**, 96-109, 2018.
- Saud P.S., Pant B., Alam A.-M., Ghouri Z.K., Park M., and Kim H.-Y., Carbon Quantum Dots Anchored TiO<sub>2</sub> Nanofibers: Effective Photocatalyst for Waste Water Treatment, *Ceram. Int.*, **41**, 11953-11959, 2015.
- Yu J., Han L., Liu S.G., Ju Y.J., Gao X., Li N.B. et al., Green Fluorescent Carbon Quantum Dots as a Label-Free Probe for Rapid and Sensitive Detection of Hematin, *Spectrochim. Acta Part A Mol. Biomol. Spectrosc.*, **212**, 167-172, 2019.
- Namdari P., Negahdari B., and Eatemadi A., Synthesis, Properties and Biomedical Applications of Carbon-Based Quantum Dots :an Updated Review, *Biomed. Pharmacother.*, **87**, 209-222, 2017.
- Shi Y., Liu X., Wang M., Huang J., Jiang X., Pang J. et al., Synthesis of N-Doped Carbon Quantum Dots from Bio-waste Lignin for Selective Irons Detection and Cellular Imaging, *Int. J. Biol. Macromol.*, **128**, 537-545, 2019.
- Rajabi H.R., Khani O., Shamsipur M., and Vatanpour V., High-Performance Pure and Fe<sup>3+</sup>- Ion Doped ZnS Quantum Dots as Green Nanophotocatalysts for the Removal of Malachite Green under UV-Light Irradiation, *J. Hazard. Mater.*, **250-251**, 370-378, 2013.
- Gyulai G., Ouanzi F., Bertóti I., Mohai M., Kolonits T., Horváti K. et al., Chemical Structure and in Vitro Cellular Uptake of Luminescent Carbon Quantum Dots Prepared by Solvothermal and Microwave Assisted Techniques, *J. Colloid Interface. Sci.*, **549**, 150-161, 2019.
- Salifairus M.J., Abd Hamid S.B., Soga T., Alrokayan S., Khan H., and Rusop M., Structural and Optical Properties of Graphene from Green Carbon Source via Thermal Chemical Vapor Deposition, *J. Mater. Res.*, **31**, 1947-1956, 2016.
- Zhong Q., Chen Y., Su A., and Wang Y., Synthesis of Catalytically Active Carbon Quantum Dots and Its Application for Colorimetric Detection of Glutathione, *Sensors Actuators B: Chem.*, **273**, 1098-1102, 2018.
- Devi P., Rajput P., Thakur A., Kim K., and Kumar P., Recent Advances in Carbon Quantum Dot-Based Sensing of Heavy Metals in Water, *TrAC Trends Anal. Chem.*, **114**, 171-95, 2019.
- Sabet M. and Mahdavi K., Green Synthesis of High Photoluminescence Nitrogen-Doped Carbon Quantum Dots from Grass Via a Simple Hydrothermal Method for Removing Organic and Inorganic Water Pollutions, *Appl. Surf. Sci.*, **463**, 283-91, 2019.
- Souza D.R., Caminhas L.D., de Mesquita J.P., and Pereira F.V., Luminescent Carbon Dots Obtained from Cellulose, *Mater. Chem. Phys.*, **203**, 148-155, 2018.
- Molaei M.J., A Review on Nanostructured Carbon Quantum Dots and Their Applications in Biotechnology, Sensors, and Chemiluminescence, *Talanta*, **196**, 456-478, 2019.
- Ramar V., Moothattu S., and Balasubramanian K., Metal Free, Sunlight and White Light Based Photocatalysis Using Carbon Quantum Dots from Citrus Grandis: A Green Way to Remove Pollution, *Sol Energy*, **169**, 120-127, 2018.
- Manan F.A.A., Hong W.W., Abdullah J., Yusof N.A., and Ahmad I., Nanocrystalline Cellulose Decorated Quantum Dots Based Tyrosinase Biosensor for Phenol Determination, *Mater. Sci. Eng. C*, **99**, 37-46, 2019.
- Soleymani J., Hasanzadeh M., Somi M.H., Ozkan S.A., and Jouyban A., Targeting and Sensing of Some Cancer Cells Using Folate Bioreceptor Functionalized Nitrogen-Doped Graphene Quantum Dots, *Int. J. Biol. Macromol.*, **118**, 1021-1034, 2018.
- Feng S., Gao Z., Liu H., Huang J., Li X., and Yang Y., Feasibility of Detection Valence Speciation of Cr (III) and Cr (VI) in Environmental Samples by Spectrofluorimetric Method with Fluorescent Carbon Quantum Dots, *Spectrochim. Acta Part A: Mol. Biomol. Spectrosc.*, **212**, 286-292, 2019.
- Athika M., Prasath A., Duraisamy E., Sankar Devi V., Selva Sharma A., and Elumalai P., Carbon Quantum Dots Derived from Denatured Milk for Efficient Chromium-Ion Sensing and Supercapacitor Applications, *Mater. Lett.*, **241**, 156-159, 2019.
- Ratnayake S.P., Mantilaka M.M.M.G.P.G., Sandaruwan C., Dahanayake D., Murugan E., Kumar S. et al., Carbon



- Quantum Dots-Decorated Nano-zirconia: A Highly Efficient Photocatalyst, *Appl. Catal. a Gen.*, **570**, 23–30, 2019.
24. Yadegari A., Khezri J., Esfandiari S., Mahdavi H., Karkhane A.A., Rahighi R. et al. Bottom up Synthesis of Nitrogen and Oxygen Co-Decorated Carbon Quantum Dots with Enhanced DNA Plasmid Expression, *Colloids Surfaces B. Biointerfaces*, **184**, 110543, 2019.
  25. Wang Z., Zhao X., Guo Z., Miao P., and Gong X., Carbon Dots Based Nanocomposite Thin Film for Highly Efficient Luminescent Solar Concentrators, *Org. Electron.*, **62**, 284–289, 2018.
  26. Arvind S., Mohapatra P.K., Kalyanasundaram D., and Kumar S., Self-Functionalized Ultra Stable Water Suspension of Luminescent Carbon Quantum Dots, *Mater. Chem. Phys.*, **225**, 23–27, 2019.
  27. Lei C.W., Hsieh M.L., and Liu W.R., A Facile Approach to Synthesize Carbon Quantum Dots with PH-Dependent Properties, *Dye Pigment.*, **169**, 73–80, 2019.
  28. Arumugam N. and Kim J., Synthesis of Carbon Quantum Dots from Broccoli and their Ability to Detect Silver Ions, *Mater. Lett.*, **219**, 37–40, 2018.
  29. Cheng J., Xu Y., Zhou D., Liu K., Geng N., Lu J. et al., Novel Carbon Quantum Dots Can Serve as an Excellent Adjuvant for The Gp85 Protein Vaccine Against Avian Leukosis Virus Subgroup J In Chickens, *Poult. Sci.*, **98**, 5315–5320, 2019.
  30. Wang Q., Wang G., Liang X., Dong X., and Zhang X., Supporting Carbon Quantum Dots on NH<sub>2</sub>-MIL-125 for Enhanced Photocatalytic Degradation of Organic Pollutants Under a Broad-Spectrum Irradiation, *Appl. Surf. Sci.*, **467–468**, 320–327, 2019.
  31. Parthiban V., Panda S.K., and Sahu A.K., Highly Fluorescent Carbon Quantum Dots-Nafion as Proton Selective Hybrid Membrane for Direct Methanol Fuel Cells, *Electrochim. Acta*, **292**, 855–864, 2018.
  32. Dong Y., Shao J., Chen C., Li H., Wang R., Chi Y. et al., Blue Luminescent Graphene Quantum Dots and Graphene Oxide Prepared by Tuning the Carbonization Degree of Citric Acid, *Carbon*, **50**, 4738–4743, 2012.
  33. Piri M., Sepehr E., and Rengel Z., Citric Acid Decreased and Humic Acid Increased Zn Sorption in Soils, *Geoderma*, **341**, 39–45, 2019.
  34. Kalaiyaran G. and Joseph J., Cholesterol Derived Carbon Quantum Dots An Fluorescence Probe for The Specific Detection of Hemoglobin in Diluted Human Blood Samples, *Mater. Sci. Eng. C*, **94**, 580–586, 2019.
  35. Yang P., Zhu Z., Chen M., Chen W., and Zhou X., Microwave-Assisted Synthesis of Xylan derived Carbon Quantum Dots for Tetracycline Sensing, *Opt. Mater. (Amst)*, **85**, 329–336, 2018.
  36. Kong L., Zhu Y., Huang G., and Wu J., Carbon Nanodots as Dual Role of Crosslinking and Reinforcing Chloroprene Rubber, *Compos. Commun.*, **22**, 100441, 2020.
  37. Sui Y., Wu L., Zhong S., and Liu Q., Carbon Quantum Dots/TiO<sub>2</sub> Nanosheets with Dominant (001) Facets for Enhanced Photocatalytic Hydrogen Evolution, *Appl. Surf. Sci.*, **480**, 810–816, 2019.
  38. Algarra M., González-Calabuig A., Radotić K., Mutavdzic D., Ania C.O., Lázaro-Martínez J.M. et al., Enhanced Electrochemical Response of Carbon Quantum Dot Modified Electrodes, *Talanta*, **178**, 679–685, 2018.
  39. Xie X., Yang Y., Xiao Y.-H., Huang X., Shi Q., and Zhang W.-D., Enhancement of Photoelectrochemical Activity of Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> Nanowires Decorated with Carbon Quantum Dots, *Int. J. Hydrogen. Energy*, **43**, 6954–6962, 2018.
  40. Vieira K.O., Bettini J., Fernando L., De Oliveira C., Luis J., and Schiavon M.A., Synthesis of Multi Color Photoluminescent Carbon Quantum Dots Functionalized with Hydrocarbons of Different Chain Lengths, *New Carbon Mater.*, **32**, 327–337, 2017.
  41. Javed M., Saqib A.N.S., Ata-ur-Rehman Ali B., Faizan M., Anang D.A., Iqbal Z. et al., Carbon Quantum Dots from Glucose Oxidation as a Highly Competent Anode Material for Lithium and Sodium-Ion Batteries, *Electrochim. Acta*, **297**, 250–257, 2019.
  42. Yang W., Yang H., Ding W., Zhang B., Zhang L., and Wang L., High Quantum Yield ZnO Quantum Dots Synthesizing via an Ultrasonication Microreactor Method, *Ultrason. Sonochem.*, **33**, 106–117, 2016.
  43. Alarfaj N., El-Tohamy M., and Oraby H., CA 19-9 Pancreatic Tumor Marker Fluorescence Immune Sensing Detection via Immobilized Carbon Quantum Dots Conjugated Gold Nanocomposite, *Int. J. Mol. Sci.*, **19**, 1162, 2018.
  44. Tian P., Tang L., Teng K.S., and Lau S.P., Graphene Quantum Dots from Chemistry to Applications, *Mater. Today Chem.*, **10**, 221–258, 2018.
  45. He M., Zhang J., Wang H., Kong Y., Xiao Y., and Xu W., Material and Optical Properties of Fluorescent Carbon Quantum Dots Fabricated from Lemon Juice via Hydrothermal Reaction, *Nanoscale. Res. Lett.*, **13**, 175, 2018.
  46. Zhang Z., Wu L., Wang P., Zhang Y., Wan S., Guo X. et al., Carbon Quantum Dots Modified La<sub>2</sub>Ti<sub>2</sub>O<sub>7</sub> Nanosheets for Visible Light Photocatalysis, *Mater. Lett.*, **230**, 72–75, 2018.
  47. Devi P., Saini S., and Kim K.-H., The Advanced Role of Carbon Quantum Dots in Nanomedical Applications, *Biosens. Bioelectron.*, **141**, 111158, 2019.
  48. Edayadiyil J.J., Abraham J., Rajeevan S. et al., Synthesis and Characterization of Natural Rubber/Graphene Quantum Dot Nanocomposites, *J. Polym. Res.*, **28**, 358, 2021.
  49. Xie F., Yang Z., Xu E., Liqun Z., and Dongmei Y., Preparation



- of Graphene Quantum Dots Modified Hydrogenated Carboxylated Nitrile Rubber Interpenetrating Cross-Linked Film, *Colloid. Polym. Sci.*, **298**, 1361–1368, 2020.
50. Li J., Guo H., Wei A., Jingzhe J., Yue J., Huijun Q. et al., Preparation and Characterization of Blue-Emitting Carbon Quantum Dots and Their Silicone Rubber Composites, *Mater. Res. Express*, **6**, 45310, 2019.
51. Takemura K., Satoh J., Boonyakida J., Park S., Chowdhury A.D., and Park E.Y., Electrochemical Detection of white Spot Syndrome Virus with a Silicone Rubber Disposable Electrode Composed of Graphene Quantum Dots and Gold Nanoparticle-Embedded Polyaniline Nanowires, *J. Nanobiotechnol.*, **18**, 1-12, 2020.